

*Г.Л. ХАВИН*, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ», Харьков.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛЫ РЕЗАНИЯ**

Розглянуто механізм взаємодії між інструментом та матеріалом при різанні з глибиною порівняною з радіусом закруглення вершини інструменту. Одержано співвідношення для обчислення ріжучої та стискаючої сил, що визначають формування стружки та якість поверхні.

The order of interaction between cutting tool and material for cutting process with commensurable depth and radius of tool point is considered. The relation for cutting and thrust forces calculation which cheap and ploughing formation is obtains.

Рассмотрен механизм взаимодействия между инструментом и материалом при резании с глубиной соизмеримой с радиусом закругления вершины инструмента. Получено соотношение для вычисления режущей и давящей составляющих силы резания, формирующих стружку и качество поверхности.

Ключевые слова: сила резания, радиус закругления вершины, моделирование процесса точения.

Моделювання процесу точення неоднородних хрупких матеріалів пов'язано з більшими труднощами, хоча б по тій причині, що на практиці неможливо передбачити якість обробленої поверхності. С одної сторони для класических хрупких матеріалів існують деякі оцінки процесу якості обробки, однак наявність в неоднородних матеріалах порожнин і порожнин не дозволяє напряму використовувати ці співвідношення. Особливу складність викликають спроби взяти до уваги радіус закруглення режущої кромки інструмента і глибину среза. Актуальність і практична цінність узагальнених теоретических досліджень особливо зростає при використанні алмазного інструмента і роботі з мікрочастинками матеріалу, коли товщина видаляемого припуску менше радіуса закруглення режущої кромки.

Існуючі в літературі дослідження ґрунтуються на представленні рівнодійствующої сили резания в вигляді двох складових – режущої і давящої (сили трия). В роботах [1,2] для режущої і давящої сили використовують поле ліній скольження. Автори розглядають два випадки: перший, коли потік матеріалу має точку розділення на режущої кромці, і другий коли, постійний нарост формується в процесі всього резания. Модель резания [3] з закругленої режущої кромкою складається з ділення області скольження на 27 різних підобластей. Модель [4] розглядає малий режущий край і виражає сили як функцію властивостей матеріалу і геометрії інструмента. Дія загальної сили в цьому випадку отримано суммуванням всіх елементів, на які дискретизується кромка інструмента. В цій моделі не передбачається розділення загальної сили резания на режущу і давячу сили. Існують і інші моделі, що використовують різні припущення [5-8].

Как известно, удельная энергия резания возрастает с убыванием толщины недеформированной стружки, что обычно представляют как эффект размера или масштабный фактор. Множество теорий объясняют причины существования эффект размера. Наиболее распространенным объяснением является влияние радиуса закругления режущей кромки инструмента, который вызывает вдавливание обрабатываемого материала и интенсифицирует появление подповерхностной пластической деформации и дальнейшее отделения материала [9].

Главным вопросом для всех процессов механической обработки является моделирование сил резания, с одной стороны отвечающих за потребляемую энергию в течение процесса обработки и, с другой стороны, определяющих износ инструмента. Из огромного количества публикаций на эту тему можно сделать вывод о явной тенденции к использованию микрообработки. Причем необходимо заметить, что просматриваются два механизма стружкообразования. Один для хрупких материалов через механизм разрушения путем прорастания трещин и режим вязкой обработки, включающий в себя удаление материала через пластическую деформацию (как противоположность хрупкому разрушению).

Модель, представленная в настоящей работе, базируется на следующем механизме удаления стружки. Когда касательное напряжение  $\tau$  превысит критическое напряжение пластического течения материала  $[\tau]$  и коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$  не превышает критического значения трещиностойкости  $K_{Ic}$  (вязкости разрушения), тогда происходит удаление материала посредством механизма локальной пластической деформации. Если  $K_I$  превысит  $K_{Ic}$ , то сьем припуска материала будет происходить через трещины разрушения.

Таким образом, переход между вязким и хрупким типом съема припуска происходит, когда коэффициент интенсивности напряжений становится равным вязкости разрушения материала. Модель, описанная ниже, представляет собой попытку связать геометрические параметры инструмента, свойства обрабатываемого материала, условия процесса обработки и рассчитать режущую и давящую силы, а также поведение стружки в процессе резания.

Рассмотрим случай ортогонального резания, когда режущая кромка перпендикулярна направлению скорости резания. На рис.1 схематично показан процесс резания вокруг режущего края АВ, который представлен как дуга окружности с центром О и радиусом  $r$ . Инструмент движется со скоростью  $V$ , которая понимается как скорость резания. Режущий инструмент имеет номинальный передний угол  $\gamma$ . Силы резания могут быть вычислены интегрированием бесконечно малой области  $dx$  вокруг точки  $K$ , которая считается наиболее нагруженной точкой контакта (точка разделения).

Мгновенное значение недеформированной толщины стружки обозначено, как  $t_0$  и срезанная толщина стружки -  $t_1$ . На рис.1 можно видеть, что мгновенное значение переднего угла отличается от номинального значения переднего угла. Мгновенное значение переднего угла  $\gamma_k$  имеет отрицательные величины и это приводит к появлению сжимающих напряжений в поверхностном слое материала ниже режущего края инструмента.

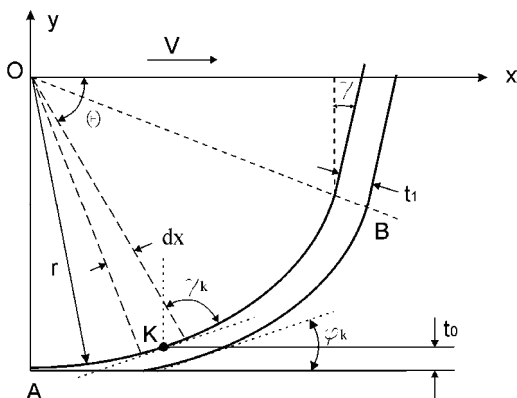


Рис. 1 – Схема взаимодействия вершины инструмента с обрабатываемым материалом

Выражение для мгновенного значения переднего угла зависит от толщины недеформированной стружки  $t_0$  и радиуса закругления режущей части инструмента, и может быть записано в виде [10]

$$\gamma_k = \theta = \sin^{-1} \left( \frac{t_0}{r} - 1 \right), \text{ если } t_0 \leq r(1 + \sin \gamma)$$

$$\gamma_k = \gamma, \text{ если } t_0 > r(1 + \sin \gamma).$$

Для определения аналитического выражения для составляющих силы резания приращение сил необходимо проинтегрировать по длине контакта инструмента с обрабатываемым материалом. Мгновенное значение угла режущей кромки  $\varphi_k$  также зависит от мгновенного значения величины толщины недеформированной стружки. Угол режущей кромки выражается через мгновенное значение переднего угла из соотношения [11]

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{k_c \cdot \cos \gamma_k}{1 - k_c \cdot \sin \gamma_k}.$$

Отношение толщины недеформированной стружки к толщине срезанной стружки -  $k_c$ , называется коэффициентом усадки стружки и его обычно подсчитывают на основе измерений стружки до и после обработки. Из рис.1 режущая и давящая силы для единичной ширины соответствуют бесконечно малой режущей кромке  $dx$  и могут быть представлены следующими выражениями

$$dF_c = \frac{\tau_c \cdot \cos(\beta_k - \gamma_k) \cdot r \cos \gamma_k}{\sin \varphi_k \cdot \cos(\varphi_k + \beta_k - \gamma_k)} d\gamma_k, \quad (1)$$

$$dF_t = \frac{\tau_c \cdot \sin(\beta_k - \gamma_k) \cdot r \cos \gamma_k}{\sin \varphi_k \cdot \cos(\varphi_k - \beta_k - \gamma_k)} d\gamma_k,$$

где  $dF_c$  и  $dF_t$  представляют собой бесконечно малые значения режущей и давящей компонент силы резания соответственно. Угол  $\beta_k$  мгновенный угол трения, который рассчитывается по коэффициенту трения. Угол  $\beta_k$  меняется в процессе резания на макро и микроуровне. Касательное напряжение пластического сдвига  $\tau_c$  рассчитывается через свойства материала.

В режиме резания материала работают одновременно два механизма – стружкообразования и диспергирования поверхности (разрыхления или вспахивания). Фактически при обработке с глубиной резания меньше, чем радиус вершины инструмента, часть материала движется впереди наклонной поверхности инструмента как стружка, а часть материала движется ниже точки округления вершины инструмента, рис.1. Определить точку, где происходит это разделения крайне сложно. По данным [12] это постоянная величина равная  $37,6^\circ$ .

Режущая и разрушающая силы для формирования стружки и диспергирования поверхности можно получить интегрированием выражения (1). Запишем эти соотношения в виде:

$$F_c = \int_{-\pi/2}^{\gamma} \frac{\tau_c \cdot \cos(\beta_k - \gamma_k) \cdot r \cos \gamma_k}{\sin \varphi_k \cdot \cos(\varphi_k + \beta_k - \gamma_k)} d\gamma_k + \frac{\tau_c \cdot \cos(\beta - \gamma) \cdot (t_0 - r(1 + \sin \gamma))}{\sin \varphi \cdot \cos(\varphi + \beta - \gamma)},$$

если  $t_0 > r(1 + \sin \gamma)$ , (2)

$$F_c = \int_{-\pi/2}^{\gamma_k} \frac{\tau_c \cdot \cos(\beta_k - \gamma_k) \cdot r \cos \gamma_k}{\sin \varphi_k \cdot \cos(\varphi_k + \beta_k - \gamma_k)} d\gamma_k, \text{ если } t_0 \leq r(1 + \sin \gamma).$$

$$F_t = \int_{-\pi/2}^{\gamma} \frac{\tau_c \cdot \sin(\beta_k - \gamma_k) \cdot r \cos \gamma_k}{\sin \varphi_k \cdot \cos(\varphi_k + \beta_k - \gamma_k)} d\gamma_k + \frac{\tau_c \cdot \sin(\beta - \gamma) \cdot (t_0 - r(1 + \sin \gamma))}{\sin \varphi \cdot \cos(\varphi + \beta - \gamma)},$$

(3)

если  $t_0 > r(1 + \sin \gamma)$ ,

$$F_t = \int_{-\pi/2}^{\gamma_k} \frac{\tau_c \cdot \sin(\beta_k - \gamma_k) \cdot r \cos \gamma_k}{\sin \varphi_k \cdot \cos(\varphi_k + \beta_k - \gamma_k)} d\gamma_k, \text{ если } t_0 \leq r(1 + \sin \gamma).$$

где  $\tau_c$  - напряжение пластического сдвига;  $\beta$  - угол сдвига и  $r$  - радиус закругления вершины инструмента.

Выводы. Таким образом, получены аналитические выражения для определения составляющих силы резания, при помощи которых можно определить характер разрушения поверхностного слоя материала, в зависимости от геометрических параметров вершины инструмента и пластических свойств материала.

Роботу виконано за проектом M2307, що фінансується міністерством освіти та науки України.

**Список литературы:** 1. *Waldroff, D. J., DeVor, R. E., Kapoor, S. G.*, A Slip-Line Field for Ploughing During Orthogonal Cutting // ASME J. Manuf. Sci. Eng., 1998.-120.- p. 693-699. 2. *Waldroff, D. J.A Simplified Model* for Ploughing Forces in Turning // Trans. NAMRI/ASME, 2004.-32.- p. 447-454. 3. *Fang, F. Z., Liu, X. D., Lee, L. C.* Micro-Machining of Optical Glasses – A Review of Diamond-Cutting Glasses // Indian Academy of Sciences, 2003.- 28 (5).- p. 945-955. 4. *Liu, K., Li, X. P.* Modeling of Ductile Cutting of Tungsten Carbide // Trans. NAMRI/SME, 2001.- 29.- p. 251-258. 5. *Kim, J. D., Kim, D. S.* Theoretical Analysis of Micro-Cutting Characteristics in Ultra-Precision Machining // J. Mater. Process. Tech., 1995.- 49.- p. 387-398. 6. *Endres, W. J., Devor, R. E., Kapoor, S. G.* A Dual-Mechanism Approach to the Prediction of Machining Forces, Part 1: Model Development // ASME J. Manuf. Sci. Eng., 1995.-117.- p. 526-533. 7. *Schimmel, R. J., Endres, W. J., Stevenson, R.* Application of an Internally Consistent Material Model to Determine the Effect of Tool Edge Geometry in Orthogonal Machining // ASME J. Manuf. Sci. Eng., 2002.-124.- p. 536-543. 8. *Kishawy, H. A., Haglund, A. J., Deiab, I. M.* An Analysis of Machining with Honed Tools Using ALE Finite Element Model: Ploughing Force and Minimum Chip Thickness // Trans. NAMRI/SME, 2006.- 34.- p. 277-284. 9. *Subbiah, S.* Some Investigations of Scaling Effects in Micro-Cutting, Ph.D. thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA, 2006. 10. *Liu, K.* Ductile Cutting for Rapid Prototyping of Tungsten Carbide Tools, Ph. D thesis, National University of Singapore, Singapore, 2002. 11. *Merchant, M. E.* Mechanics of Metal Cutting Process // J. Appl. Phys. 1945.- 16.- p. 267-318. 12. *Basuray, P. K., Mishra, B. K., Lal, G. K.* Transition from Ploughing to Cutting During Cutting with Blunt Tool // Wear, 1977.- 43.- p. 341-349.

Надійшло до редколегії 15.04.2011 р.